

клеевой композиции необходимо поддерживать влажность воздуха не более 50%.

Результаты исследований приняты техническими советами АО КИСК и Овсянкинский ДПК для использования при реконструкции цехов ДСтП.

## Литература

1. А.с. 642212 СССР, МКИ В27 N3/18. Устройство для смешивания древесных частиц со связующим/ Востров В.Н., Вайс А.А., Баранов Ю.С. № 2500514/29-15; Заявл. 23.06.77; Оpubл. 1979, Бюл. №2.

2. Баранов Ю.С., Вайс А.А., Востров В.Н. К вопросу изменения адгезионных сил порошкообразного связующего на древесине// Стандартизация и измерительная техника: Межвуз. сборн. науч. трудов. Красноярск: КПИ. 1978, №4. С. 115-117.

УДК 678.652+674.815-41

В.Г. Буриндин, В.В. Глухих, С.В. Томилова,  
Т.А. Глазырина  
(Уральская государственная лесотехническая  
академия)

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КАРБАМИДНОЙ СМОЛЫ ПКП-11 ДЛЯ ДРЕВЕСНОСТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ

Проведены промышленные эксперименты получения малотоксичной карбамидной смолы марки ПКП-11 периодическим способом на технологической линии ПК "Полимер" АООТ "Уралхимпласт" (г. Нижний Тагил). Получены статистические модели влияния технологических факторов на свойства полупродуктов, готовой смолы и ДСтП, достоверность которых подтверждена выпуском опытно-промышленных партий КФС и ДСтП на их основе.

Для управления технологическими процессами необходимо знать количественные взаимосвязи между значениями технологических параметров и свойствами готовой продукции. Знание этих закономерностей позволяет не только прогнозировать ход техно-

логических процессов, но и оптимизировать свойства получаемой продукции.

В связи с тем, что получение детерминированных математических моделей химических процессов требует глубокого знания физико-химических закономерностей, а также больших затрат средств и времени, в работе были исследованы статистические модели свойств полупродуктов и готовой смолы ПКП-11 для реальных промышленных условий ПК "Полимер".

Хотя статистические математические модели обладают меньшей прогнозирующей способностью, чем детерминированные, но для их получения не требуется знать механизмы и закономерности всех процессов. Модель строится на основании статистической обработки данных экспериментов и представляет собой формальное описание взаимосвязи между входными и выходными параметрами процессов.

Анализ результатов показывает, что путем проведения активного эксперимента и оптимизации математических статистических моделей свойств КФС марки КФ-МТ-15 и ДСтП на ее основе можно получать плиты класса эмиссии формальдегида E2 [1,2]. Найденные оптимальные условия в рамках технологии КФ-МТ-15 позволили разработать новую марку смолы КФ-МТ-15Н (ТУ 25.471-42-94), которая дает возможность стабильно получать ДСтП с выделением формальдегида не более 15 мг/100 г плиты.

Исследованиями, проводимыми на кафедре технологии переработки пластмасс УГЛТА [1], показано, что физико-механические свойства ДСтП и их токсичность определяются функциональным составом КФС. Считаем, что формирование химического строения и функционального состава готовых КФС в основном определяется соотношением и составом мономерных продуктов, образующихся на первой стадии синтеза смол. Эта гипотеза согласуется с высказыванием Richard M. Rammon [3] о том, что на щелочной стадии имеется больше возможностей в изменении структуры КФС, чем на кислой стадии.

В связи с этим нами была предпринята попытка путем изменения химического состава конденсационного раствора добиться получения КФС, позволяющих изготавливать экологически безопасные древесные композиционные материалы класса E0-E1.

С этой целью нами разработан новый способ синтеза КФС путем предварительного получения карбамидоформальдегидного конденсата (КФК) с мольным соотношением К:Ф = 0,8-2,0:1 [4].

Все технологические параметры синтеза КФС ПКП-11 условно разделены на факторы  $Z_i$  и свойства изучаемых объектов  $y_j$ . К входным факторам отнесены такие параметры технологического процесса синтеза КФС, которые можно на ПК "Полимер" не только измерять, но и регулировать. Под изучаемым объектом подразумевали свойства полупродуктов, готовой смолы и ДСтП.

Статистическая математическая модель объекта представлена в виде системы линейных полиномов первого порядка:

$$y_1 = b_0^{(1)} + b_1^{(1)}Z_1 + b_2^{(1)}Z_2 + \dots + b_i^{(1)}Z_i + \dots + b_k^{(1)}Z_k;$$

$$y_2 = b_0^{(2)} + b_1^{(2)}Z_1 + b_2^{(2)}Z_2 + \dots + b_i^{(2)}Z_i + \dots + b_k^{(2)}Z_k;$$

$$y_3 = b_0^{(3)} + b_1^{(3)}Z_1 + b_2^{(3)}Z_2 + \dots + b_i^{(3)}Z_i + \dots + b_k^{(3)}Z_k;$$

.....

$$y_j = b_0^{(j)} + b_1^{(j)}Z_1 + b_2^{(j)}Z_2 + \dots + b_i^{(j)}Z_i + \dots + b_k^{(j)}Z_k;$$

.....

$$y_n = b_0^{(n)} + b_1^{(n)}Z_1 + b_2^{(n)}Z_2 + \dots + b_i^{(n)}Z_i + \dots + b_k^{(n)}Z_k,$$

где  $y_j$  - расчетные значения свойства объекта;  $j$  - индекс свойства объекта;  $i$  - индекс фактора;  $n$  - число свойств объекта в модели;  $k$  - число факторов в модели;  $b_i^{(j)}$  - коэффициент, оценивающий эффект влияния на  $j$ -е свойство объекта  $i$ -го фактора.

Были получены данные о протекании технологических операций синтеза ПКП-11 периодическим способом и их свойствах, а также были изготовлены и испытаны по ГОСТ 10632-89 лабораторные образцы ДСтП (табл.1,2).

Исходя из анализа литературных данных и состояния технологического контроля, на ПК "Полимер" в качестве независимых входных факторов  $z_i$  при синтезе смолы ПКП-11 были взяты следующие :

$z_1$  - применение этиленгликоля в количестве 0,1 % от массы конденсационного раствора ( 0 - нет; 1 - да ) ;

$z_3$  - применение КФК для получения конденсационного раствора ( 0 - не используется ; 1 - КФК мольного соотношения К:Ф=1:1; 1,4 - КФК мольного соотношения 1,4:1 ) ;

- $z_4$  - кислотное число формалина, % ;
- $z_5$  - массовая концентрация метанола в формалине, % ;
- $z_6$  - массовая концентрация формальдегида в формалине, % ;
- $z_7$  - количество добавленного раствора NaOH на стадии приготовления конденсационного раствора, л ;
- $z_{22}$  - начальное мольное соотношение формальдегида и карбамида на стадии приготовления конденсационного раствора.
- $z_{23}$  - температура реакционной массы на стадии конденсации в нейтральной среде,  $^{\circ}\text{C}$  ;
- $z_{27}$  - pH реакционной массы на стадии конденсации в кислой среде ;
- $z_{28}$  - температура реакционной массы на стадии кислой конденсации,  $^{\circ}\text{C}$  ;
- $z_{31}$  - степень конденсации на кислой стадии ;
- $z_{34}$  - pH реакционной массы на стадии нейтрализации и сушки;
- $z_{35}$  - температура на стадии нейтрализации и сушки,  $^{\circ}\text{C}$  ;
- $z_{40}$  - pH реакционной массы на стадии доконденсации с карбамидом;
- $z_{41}$  - температура реакционной массы на стадии доконденсации с карбамидом,  $^{\circ}\text{C}$  ;
- $z_{42}$  - количество добавляемого карбамида на стадии доконденсации, кг ;

В качестве выходных параметров модели были использованы свойства полупродуктов и готовой смолы, а также токсичность и физико-механические свойства ДСтП.

После проведения на ПЭВМ множественного линейного регрессионного анализа с применением современного пакета прикладных программ при табличных значениях критерия Фишера ( $F=4$ ) были получены модели с адекватными уравнениями регрессии, описывающими свойства полупродуктов, готовой смолы ПКП-11 и ДСтП с высокой доверительной вероятностью (см.табл.3-5). Рассчитанные по результатам пассивного эксперимента коэффициенты  $b_i^{(j)}$  являются взаимосвязанными между собой и поэтому могут служить для приблизительной оценки влияния соответствующего фактора. Знак коэффициента  $b_i^{(j)}$  говорит о направлении изменения свойства объекта при увеличении значения соответствующего фактора. Сила влияния фактора на свойство объекта оценивалась по величине расчетного критерия Фишера  $F_i^{(j)}$ . Прогнозирующая сила уравнений модели оценивалась по до-

Физико-химические свойства образцов КФС ПКП-11, полученных при активном эксперименте

Таблица 1

№ опыта	Показатель преломления	Массовая доля сухого остатка, %	Массовая доля свободного формальдегида, %	Условная вязкость по ВЗ-4, с	pH	Время желизации при 100°C, с	Предельная смещаемость смолы с водой
1	1,468	66,0	0,03	72	7,35	100	1:6
2	1,465	62,5	0,01	33	6,85	98	1:7
3	1,474	69,8	0,06	126	7,40	160	1:3
4	1,462	64,1	0,05	37	7,15	105	1:5
5	1,469	68,4	0,06	95	7,50	105	1:4
6	1,467	65,7	0,07	186	6,90	103	1:1
7	1,464	---	0,12	60	7,20	74	1:3
8	1,464	64,2	0,08	60	7,20	74	1:3
9	1,465	---	0,20	63	6,80	65	1:4
10	1,467	---	0,07	102	7,50	94	1:4
11	1,465	---	0,11	73	8,50	74	1:5
12	1,465	---	0,08	45	7,10	120	1:3
13	1,464	---	0,12	88	7,35	71	1:4
14	1,466	---	0,10	61	7,30	72	1:6
15	1,468	64,4	0,05	99	8,00	105	1:4
16	1,462	61,6	0,06	72	7,60	73	1:3

Таблица 2

Физико-механические свойства и токсичность древесностружечных плит

№ опыта	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность при изгибе, МПа	Прочность при разрыве, МПа	Разбухание за 24 ч, %	Водопоглощение за 24 ч, %	Выделение формальдегида (метод WKI), мг/100 г	Влажность, %
1	667	15,3(17,1)	---	27(26)	94(90)	12,1(9,8)	4,4
2	685	14,4(15,1)	---	32(32)	94(93)	10,7(9,6)	4,2
3	769	18,1(14,5)	---	37(38)	83(91)	5,4(10,0)	3,7
4	782	17,7(13,4)	0,75(0,70)	33(35)	72(81)	2,5(8,0)	4,3
5	665	16,8(18,6)	1,10(1,11)	22(21)	78(74)	18,2(15,8)	5,9
6	707	16,7(16,3)	0,60(0,59)	25(26)	76(77)	16,2(16,6)	5,3
7	675	16,7(18,0)	0,68(0,69)	19(18)	72(69)	36,6(34,9)	5,8
8	669	18,1(19,7)	0,90(0,91)	23(22)	77(74)	18,1(16,0)	5,5
9	704	19,8(19,6)	1,00(0,99)	22(22)	70(70)	23,1(23,3)	5,7
10	712	14,2(13,5)	1,00(0,99)	26(27)	76(77)	9,4(10,2)	5,5
11	660	17,7(19,7)	1,10(1,12)	22(22)	81(76)	10,1(7,3)	5,7
12	640	18,5(21,6)	1,10(1,13)	24(23)	---	22,0(17,9)	5,4
13	647	17,2(19,9)	1,30(1,32)	15(14)	76(70)	46,2(42,6)	5,7
14	659	19,4(21,5)	1,60(1,62)	15(15)	75(70)	29,2(26,4)	5,7
15	608	10,4(15,2)	---	17(15)	83(73)	11,8(5,6)	---
16	608	9,4(14,2)	---	17(15)	85(75)	18,5(12,3)	4,4

Примечание. В скобках приведены физико-механические свойства ДСтП, пересчитанные на плотность 700 кг/м<sup>3</sup>.

верительной вероятности  $\beta_j$ , расчетных значений свойств объекта, вычисленных по уравнению  $\hat{y}_j$ , в сравнении с реально полученными свойствами полупродуктов, готовой смолы ПКП-11 и ДСтП [5].

Данные табл. 3-5 можно анализировать следующим образом. На вязкость реакционной массы после щелочной стадии  $y_{28}$  наибольшее влияние оказывает (см. табл. 3) содержание кислот в формалине ( $F_4^{(20)} = 536,7$ ) и содержание метанола в формалине ( $F_5^{(20)} = 139,8$ ), а также объем раствора щелочи для нейтрализации формалина ( $F_7^{(20)} = 86,6$ ) и применение КФК для приготовления конденсационного раствора ( $F_3^{(20)} = 85,8$ ).

Таблица 3

Параметры статической модели свойств продуктов реакции на стадии щелочной конденсации при синтезе смолы ПКП-11

Параметры модели	Значения параметров модели для свойств продуктов реакции $y_i$		
	рН $y_{24}$	Показатель преломления $y_{25}$	Вязкость по ВЗ-4, с $y_{26}$
$b_0^{(j)} / F_0^{(j)}$	23,1433/---	1,3667/---	16,5072/---
$b_1^{(j)} / F_1^{(j)}$	0,1631/7,08	-0,00101/3,65	---
$b_3^{(j)} / F_3^{(j)}$	---	---	-0,3238/85,84
$b_4^{(j)} / F_4^{(j)}$	50,1742/17,64	-0,1977/10,91	-
$b_5^{(j)} / F_5^{(j)}$	---	0,00053/12,94	233,265/536,75
$b_7^{(j)} / F_7^{(j)}$	0,0103/69,66	---	0,1485/139,58
$b_{22}^{(j)} / F_{22}^{(j)}$	-11,0107/84,06	0,01764/4,78	---
$b_{23}^{(j)} / F_{23}^{(j)}$	0,0291/4,82	0,00021/5,60	---
$\beta_j$	0,965	0,932	0,990

Доверительная вероятность прогнозирующих значений вязкости составляет 99% при расчете по уравнению:

$$y_{26} = 16,5072 - 0,3238z_3 - 233,265z_4 + 0,1485z_5 - 0,01045z_7.$$

Анализ свойств готовой ПКП-11 после стандартизации (см. табл.4) показал, что на все пять показателей свойств смолы влияет применение этиленгликоля  $z_1$ , объем раствора щелочи  $z_7$ , используемого для нейтрализации формалина, рН реакционной массы на стадии вакуум-сушки  $z_{34}$ , на четыре показателя смолы влияет сте-

Таблица 4  
 Параметры статистической модели свойств смолы ПКП-11 на стадии стандартизации

Параметры модели	Значения параметров модели для свойств продуктов реакции $У_1$				
	Вязкость $У_{50}$ по ВЗ-4, с	Показатель преломления $У_{40}$	Массовая доля свободного формальдегида $У_{51}$ , %	Предельная сшиваемость смолы с водой $У_{53}$	Время желатинизации при 100°C $У_{52}$ , с
$b_0^{(U)} / F_0^{(U)}$	8977,656/---	1,997/---	1,6383/---	-369,256/---	7662,562/---
$b_1^{(U)} / F_1^{(U)}$	-275,854/15,52	-0,0070/5,93	0,01709/17,31	7,1764/123,52	-185,933/17,37
$b_2^{(U)} / F_2^{(U)}$	---	---	---	-6,7419/163,05	---
$b_3^{(U)} / F_3^{(U)}$	-9158,09/2,24	---	---	-406,061/20,73	---
$b_4^{(U)} / F_4^{(U)}$	---	---	-0,1325/549,03	-3,9071/76,07	---
$b_5^{(U)} / F_5^{(U)}$	---	---	0,3038/527,84	14,6511/83,80	---
$b_6^{(U)} / F_6^{(U)}$	---	---	0,00069/533,72	0,1682/140,82	-1,1912/15,47
$b_7^{(U)} / F_7^{(U)}$	-2,813/11,28	-0,00012/8,27	-4,458/1981,85	33,7402/22,71	-1316,50/5,21
$b_{22}^{(U)} / F_{22}^{(U)}$	---	---	---	---	-15,7519/9,18
$b_{23}^{(U)} / F_{23}^{(U)}$	-32,352/8,15	-0,00068/2,59	0,8773/592,02	---	---
$b_{27}^{(U)} / F_{27}^{(U)}$	---	---	---	-3,4588/95,83	---
$b_{28}^{(U)} / F_{28}^{(U)}$	---	---	---	---	---
$b_{31}^{(U)} / F_{31}^{(U)}$	34,717/3,23	0,00305/5,04	0,1019/2987,64	---	72,132/12,36
$b_{34}^{(U)} / F_{34}^{(U)}$	-181,281/11,55	-0,00521/2,82	0,0697/129,97	11,8262/155,60	-95,010/12,06
$b_{35}^{(U)} / F_{35}^{(U)}$	-55,089/8,06	-0,00474/13,75	-0,1137/988,96	---	-38,591/10,30
$b_{40}^{(U)} / F_{40}^{(U)}$	---	---	0,1082/1087,21	---	---
$b_{41}^{(U)} / F_{41}^{(U)}$	13,455/12,26	---	0,00539/1584,05	0,2100/29,12	5,6062/8,16
$b_{42}^{(U)} / F_{42}^{(U)}$	0,1096/8,82	0,00001/14,96	0,00031/842,14	---	0,1575/17,69
$\beta_1$	0,629	0,545	0,999	0,953	0,782



Таблица 5  
Параметры статистической модели физико-механических свойств и токсичности ДС-П  
на основе ПКП-11

Параметры модели	Значения параметров модели для свойств продуктов реакции У <sub>г</sub>				Выделение формальдегида У <sub>ф</sub> методом WKI, мг/100 г
	Водопоглощение У <sub>в</sub> за 24 ч, %	Разбухание У <sub>г</sub> за 24 ч, %	Прочность У <sub>в</sub> при изгибе, МПа	Прочность У <sub>в</sub> при разрыве, МПа	
$b_0^{(U)} / F_0^{(U)}$	16,6149/---	403,980/---	93,639/---	18,865/---	2815,741/---
$b_1^{(U)} / F_1^{(U)}$	---	-14,903/1232,23	---	---	-33,0358/42,87
$b_3^{(U)} / F_3^{(U)}$	4,8950/2,52	---	---	---	79,3966/277,83
$b_4^{(U)} / F_4^{(U)}$	---	-1454,95/829,66	682,708/30,31	138,917/99,10	12335,9/204,03
$b_5^{(U)} / F_5^{(U)}$	---	1,2914/43,79	---	---	7,1506/19,29
$b_6^{(U)} / F_6^{(U)}$	---	-6,9849/142,21	---	---	-45,2837/43,63
$b_7^{(U)} / F_7^{(U)}$	---	-0,2223/1782,96	0,07267/34,59	0,0463/58,56	---
$b_{12}^{(U)} / F_{12}^{(U)}$	330,6897/13,35	75,1021/275,73	---	---	-1371,08/236,05
$b_{23}^{(U)} / F_{23}^{(U)}$	---	-1,8673/544,57	---	---	11,7504/314,72
$b_{27}^{(U)} / F_{27}^{(U)}$	-104,9130/10,46	13,8083/71,68	-13,6570/11,44	-0,7033/4,90	-229,682/136,38
$b_{28}^{(U)} / F_{28}^{(U)}$	---	---	---	-0,09342/17,88	17,5515/197,59
$b_{31}^{(U)} / F_{31}^{(U)}$	-11,800/13,28	---	0,7187/6,97	---	---
$b_{34}^{(U)} / F_{34}^{(U)}$	---	-13,5501/1717,31	---	---	-41,6966/90,13
$b_{35}^{(U)} / F_{35}^{(U)}$	---	---	---	0,1137/32,49	---
$b_{40}^{(U)} / F_{40}^{(U)}$	-5,4317/2,93	-5,9973/506,76	-3,2035/17,81	0,1711/11,93	---
$b_{41}^{(U)} / F_{41}^{(U)}$	---	0,2917/100,69	-0,08296/3,86	-0,0138/12,26	-2,7863/134,43
$b_{42}^{(U)} / F_{42}^{(U)}$	-0,005719/4,27	0,00704/420,65	-0,00172/16,10	0,000161/28,31	0,04497/108,63
$\mu_j$	0,922	0,999	0,918	0,992	0,990

пень конденсации  $z_{31}$ , температура на стадиях вакуум-сушки  $z_{35}$  и доконденсации  $z_{41}$ , масса второй порции карбамида  $z_{42}$ .

Согласно литературным данным, низкомолекулярные малотоксичные карбамидные смолы имеют ряд недостатков: большое время желатинизации и малый срок хранения смолы (2-3 недели).

Поэтому, используя полученные статистические модели, провели оптимизацию с целью получения карбамидной смолы, имеющей небольшое время желатинизации и позволяющей получать ДСтП класса токсичности Е1-Е0. При проведении оптимизации в качестве "Goal" функции использовали время желатинизации  $y_{52}$  и выделение формальдегида из ДСтП ( $y_{59}$ ) с применением ППП "Эврика":

$$y_{52} = 7662,5 + 0,157z_{42} + 5,606z_{41} - 38,59z_{35} - 95,01z_{34} + 72,13z_{31} - 15,75z_{23} - 1316,5z_{22} - 185,93z_1 - 1,19z_7 ;$$

$$y_{59} = 476,3 + 0,0148z_{42} - 1,643z_{41} - 122,4z_{27} + 6,78z_{28} + 8,44z_{23} - 684,01z_{22} + 39,4z_3 + 4957,6z_4 .$$

Результаты расчетов приведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты поиска оптимальных значений технологических факторов синтеза смолы ПКП-11

Технологические факторы	Значения технологических факторов синтеза смолы при параметрах оптимизации	
	Время желатинизации	Выделение формальдегида
$z_1$ , %	0,81	---
$z_3$ , моль/моль	---	1,0
$z_4$ , %	---	0,013
$z_7$ , л	83,6	---
$z_{22}$ , моль/моль	1,95	1,95
$z_{23}$ , °С	84,5	85,8
$z_{27}$ , ед.	---	4,7
$z_{28}$ , °С	---	95,9
$z_{31}$ , раз	2,00	---
$z_{34}$ , ед.	7,4	---
$z_{35}$ , °С	92,9	---
$z_{41}$ , °С	46,6	45,4
$z_{42}$ , кг	2822	2727
Расчетное значение параметра оптимизации:		
время желатинизации, с;	60	---
выделение формальдегида, мг/100 г	---	3,0

При полученных оптимальных условиях технологических факторов осуществлен промышленный синтез смолы ПКП-11 и получена смола со следующими характеристиками :

pH = 7,6 ; сухой остаток 61,6 % ; условная вязкость по ВЗ-4 72 с ; массовая доля свободного формальдегида 0,06 % ; время желатинизации 73 с ; предельная смешиваемость 1:3 .

С применением данной партии смолы ПКП-11 на АООТ ДСП (г. Екатеринбург) изготовлены ДСтП, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 10632-89, а токсичность плит по методу WKI составила 5,6 мг/100 г ; перфораторное значение - 2,3 мг/ 100 г плиты, что позволяет отнести их к классу E1-E0.

Эти же результаты подтверждены при изготовлении ДСтП на предприятиях Венгрии ( Фалько, Интершпан ). Перфораторное значение равно соответственно 7,0 и 3,2 мг/100 г.

Таким образом, полученные статистические модели показали возможность с высокой степенью достоверности прогнозировать свойства КФС марки ПКП-11 и ДСтП на ее основе.

## Литература

1. Глухих В.В. Снижение токсичности древесных композиционных материалов на основе оптимизации химического состава карбамидных связующих. Дис. ... д-ра. техн. наук/УГЛТА. Екатеринбург, 1994. 172 с.

2. Оптимизация процессов получения малотоксичных карбамидных смол для производства древесностружечных плит/ Буриндин В.Г., Глухих В.В., Ляхов В.К., Михеев А.А.// Тез. доклада II международного симпозиума "Строение, свойства и качество древесины-96". М.: МГУЛ, 1996. С.91.

3. Rammon R.M., Jonhs W.E., Magnuson J., Dunker A.K. The chemical structure of UF Resins. J.Adhesion, 1986. V. 19. P. 115-135.

4. Пат. 20061707 РФ, МКИ С 08 G 12/12. Способ получения карбамидоформальдегидной смолы/ В.Г. Буриндин, В.В. Глухих, В.К. Ляхов, А.А. Михеев. № 94004569; Заявл. 08.02.94; Оpubл. 10.06.96, Бюл. №16.

5. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. М.:Высшая школа, 1985. 327 с.